Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 36, 4, 2024. (75-92)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Effect of Friction Stir Welding parameters on the Mechanical Properties of Copper Sheets under Helium Gas

Research Article

Mojtaba Vakili-Azghandi[1], Saeed Yaghoubi[2], Ali Shirazi [3], Amin Novin[4]

https://doi.org/10.22067/jacsm.2024.85831.1226

Abstract *In this research, copper sheets were joined using the friction stir welding method under various welding conditions, including different rotational and translational tool speeds, as well as one-pass and two-pass welding processes. Helium gas was used as a protective atmosphere during welding. Blowing helium gas over the welds and welding tools prevented air from contacting them, thereby avoiding the adverse effects of air exposure. Due to the softness of copper and the thinness of the sheets, J-integral samples were used in this study instead of critical stress intensity factor (KIC) samples. The J-integral values were measured using compact tension (C(T)) specimens. The results demonstrated that the recrystallization phenomenon in the stir zone led to significant improvements in fracture toughness and Vickers hardness, increasing them by 41.49% and 52.85%, respectively, compared to the base metal. However, the annealing phenomenon in the heat-affected zone resulted in the degradation of microstructural and mechanical properties. Specifically, Vickers hardness, ultimate strength, and fracture toughness decreased by 28.57%, 33.90%, and 10.98%, respectively, compared to the base metal. Furthermore, the findings indicated that achieving superior weld quality is more feasible at lower temperatures with fewer welding passes. This approach minimizes heat transfer to the workpiece, thereby preserving its mechanical and microstructural integrity.*

Keywords: Friction stir welding; Helium shielding gas; Mechanical properties; Welding parameters; J-Integral.

1- Introduction

Recently, with the increasing use of copper and its alloys as structural materials in various industrial applications, the demand for effective welding methods has grown significantly. As a result, copper was chosen as the focus of the present study.

In this study, copper sheets were welded using the friction stir welding method under varying conditions, including different rotational and traverse tool speeds and varying numbers of welding passes. To prevent oxidation during welding, helium gas was used as a protective atmosphere. Subsequently, the welds produced under these different conditions were evaluated for their tensile properties, Vickers hardness, fracture toughness, and microstructural characteristics.

2- Materials and methods

Copper plates with dimensions of 50 mm × 110 mm were cut from a larger sheet with a thickness of 5 mm, oriented perpendicular to the rolling direction. Both halves were sanded and polished to prepare the surfaces for welding. The copper plates, along with the die and its accessories, are shown in Fig. 1.

As illustrated in Fig. 1, a protective gas was blown over the welding area and tool during the welding process using a gas hose to prevent oxidation. In this study, pure helium gas was employed as the shielding gas to protect the welding area and tools from oxidation. For welding the copper sheets, rotational speeds of 550 rpm and 850 rpm were used, along with traverse speeds of 50 mm/min and 100 mm/min, and one-pass and two-pass welding processes were performed.

To determine the grain size in the three welding zones—the Stirring Zone (SZ), Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ), and Heat-Affected Zone (HAZ)—the welded copper plates were sectioned perpendicular to the welding direction. After undergoing the etching process, the three welding zones were identified using an optical microscope. Additionally, Vickers hardness and fracture toughness were measured

*Manuscript received: December 11, 2023. Revised, May 12, 2024, Accepted, June 16, 2024.

[1] Assistant Professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, University of Gonabad, Gonabad, Iran.

[۲] Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Ilam, Iran.

[3] Corresponding Author: Ph.D. Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
Email: a.shirazi.h@gmail.com

[4] M.SC Sama Islamshahr Boys Complex, Islamshahr, Tehran, Iran.

for the different zones produced during welding. The tensile properties of the welds were also evaluated.

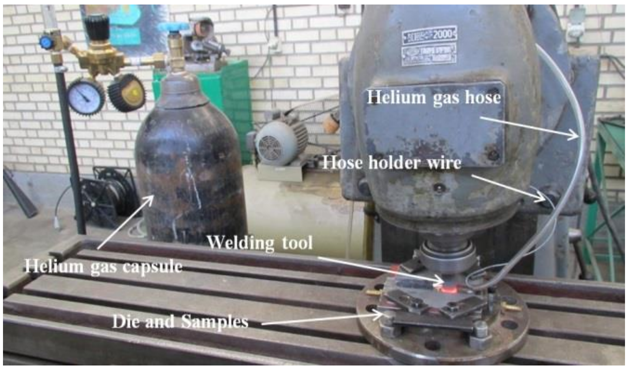


Figure 1: Copper plates and die and its accessories

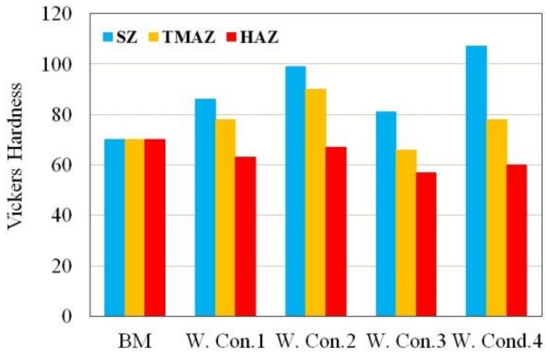


Figure. 2: Copper plates and die and its accessories

Table 1: Grains size and their changes relative to the base metal for the HAZ and the SZ for different welding conditions

Welding Conditions	HAZ		SZ	
	Change relative to BM (%)	Grains size (μm)	Change relative to BM (%)	Grains size (μm)
W. Con.1	17.8	17.9±1.2	-67.8	4.9±0.32
W. Con.2	8.6	16.5±0.7	-77.6	3.4±0.15
W. Con.3	42.8	21.7±1.9	-25.0	11.4±0.84
W. Con.4	36.8	20.8±1.7	-82.2	2.7±0.08
BM	-	15.2±0.8	-	15.2±0.8

Table 2: The maximum values of the elastic loads and the values obtained for J_{IC} and K_{IC}

Welding Conditions	HAZ			SZ		
	P_{el} (N)	J_{IC} (KJ/m^2)	K_{IC} (MPa$\sqrt{m}$)	P_{el} (N)	J_{IC} (KJ/m^2)	K_{IC} (MPa$\sqrt{m}$)
W. Con.1	987±49	3.16	20.51	1237±52	4.96	25.71
W. Con.1	1017±73	3.35	21.13	1335±121	5.77	27.74
W. Con.1	932±53	2.81	19.37	1113±75	4.01	23.13
W. Con.1	976±61	3.08	20.28	1482±127	7.11	30.79
BM	1047±88	3.55	21.67	1047±88	3.55	21.76

3. Results and Discussion

The grain sizes of the HAZ and SZ are presented in Table 1. The values in this table can be explained by considering the heat transfer rates under various welding conditions. Specifically, a decrease in the rotational speed of the tool reduces the rate of heat transfer to the welded samples, while a reduction in the traverse speed of the tool increases the heat transfer rate to the samples. These relationships justify the observed grain size variations under different welding conditions.

Based on Vickers microhardness measurements, the data obtained are presented in Fig. 2. This figure indicates that, in general, the Vickers hardness values of the welds decrease as the heat transfer rate to the samples increases under different welding conditions. Consequently, the minimum hardness is observed in welding mode 3, where the rotational speed of the tool is 850 rpm, resulting in significant heat transfer to the welding plate. This trend is consistent across all three welding zones.

The true stress-strain curves of the base metal and the sheets joined under different welding conditions were also determined in this research. After conducting the tensile tests, it was observed that all the tensile test samples prepared from the welded sheets fractured in the heat-affected zone (HAZ). This indicates that the heat-affected area is the weakest region in the weld.

All the C(T) samples were subjected to tension using a 2.5-ton Zwick tensile machine, and their force-displacement diagrams were obtained. Based on these graphs, the maximum elastic load values were determined. Subsequently, the JJJ-integral values for different welding conditions in the HAZ and the stir zone (SZ) were calculated and are presented in Table 2. This table shows that, across all welding conditions, the fracture toughness of the HAZ is lower than that of the base metal, whereas the fracture toughness of the SZ is higher than that of the base metal. For example, in W. Con. 3, the fracture toughness of the HAZ decreased by 10.98%, while in W. Con. 4, the fracture toughness of the SZ increased by 41.49% compared to the base metal.

4. Conclusions

In this study, copper plates were joined using the friction stir welding process under various welding parameters with helium shielding gas. The objective was to investigate the mechanical properties of the welds, including microhardness, tensile properties, fracture toughness, and their microstructure. Based on the findings, the following conclusions were drawn:

1. ***Improvement in SZ properties**:* The friction stir welding process improved the mechanical properties in the SZ. The increase in grain boundaries and reduction of stress concentration effects significantly enhanced fracture toughness in the SZ. For instance, in W. Con. 4, with two welding passes, fracture toughness increased by 41.49% compared to the base metal.

2. ***Effect of welding passes**:* Increasing the number of welding passes enhanced the mechanical properties in the SZ but degraded the properties in the HAZ, which is the weakest region of the weld. To achieve better mechanical properties, it is recommended to perform the welding process under conditions that minimize heat transfer to the workpiece rather than increasing the number of welding passes.

3. ***Recrystallization and grain refinement**:* The recrystallization phenomenon led to significant grain refinement in the SZ, thereby improving its mechanical properties. For example, in W. Con. 4, with two welding passes, Vickers hardness in the SZ increased by 52.85% compared to the base metal. Conversely, the annealing phenomenon in the HAZ reduced both microstructural and mechanical properties. In W. Con. 3, for instance, Vickers hardness in the HAZ decreased by 28.57%, ultimate strength by 33.9%, and fracture toughness by 10.98% compared to the base metal.

4. ***Importance of tool parameters**:* The rotational and traverse speeds of the welding tool are critical factors influencing the microstructural and mechanical properties of the welds. These parameters determine the amount of heat transferred to the workpiece, thereby impacting the characteristics of the weld. For example, in W. Con. 3, the high rotational speed of the tool caused grain growth in the HAZ by 42.8% compared to the base metal, whereas in W. Con. 2, the grain growth was only 8.6%.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک
http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir
انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران
دانشگاه فردوسی مشهد

بررسی اثر پارامترهای جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی بر خواص مکانیکی ورق‌های مسی تحت گاز هلیم*

مقاله پژوهشی

مجتبی وکیلی ازغندی(۱) سعید یعقوبی(۲) علی شیرازی(۳) امین نوین(۴)

https://doi.org/10.22067/jacsm.2024.85831.1226

چکیده *در این تحقیق، ورق‌های مسی با شرایط مختلف جوش‌کاری شامل سرعت‌های مختلف دورانی و انتقالی ابزار و نیز به تعداد یک و دو پاس جوش به روش جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی به یکدیگر متصل شده‌اند. این جوش‌کاری‌ها تحت گاز هلیوم به عنوان گاز محافظ انجام شده‌اند. دمیدن گاز هلیوم بر روی جوش‌ها و ابزار جوش‌کاری سبب می‌شود که از تماس هوا با آنها جلوگیری شود و از اثرات نامطلوبی که هوا بر آنها می‌تواند بگذارد، اجتناب گردد. در این تحقیق به علت نرم بودن فلز مس و نازک بودن ورق‌ها به جای نمونه‌های ضریب شدت تنش بحرانی K_{IC} از نمونه‌های انتگرال J- استفاده شده است. این کمیت با ساخت نمونه‌های C(T) اندازه‌گیری شد. نتایج این مطالعه نشان داد که به دلیل وقوع پدیده تبلور مجدد در منطقه اغتشاشی، چقرمگی شکست و سختی ویکرز می‌تواند به ترتیب ۴۱/۴۹٪ و ۵۲/۸۵٪ نسبت به فلز پایه افزایش یابند. وقوع پدیده آنیل شدن در ناحیه متأثر از گرما منجر به تنزل خواص ریزساختاری و مکانیکی می‌شود، به گونه‌ای که میزان سختی ویکرز، استحکام نهایی و چقرمگی شکست نسبت به فلز پایه به ترتیب ۲۸/۵۷٪، ۳۳/۹۰٪ و ۱۰/۹۸٪ می‌توانند کاهش پیدا کنند. علاوه بر این، نتایج تحقیق نشان داد که برای به دست آوردن یک جوش بهتر، مناسب‌تر است که به جای انجام دو یا چند پاس جوش‌کاری، فرایند جوش‌کاری را در دمای کمتری انجام داد، به گونه‌ای که گرمای کمتری به قطعه‌کار منتقل شود.*

واژه‌های کلیدی جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی، گاز محافظ هلیوم، خواص مکانیکی، پارامترهای جوش‌کاری، انتگرال–J.

مقدمه

اخیرا با گسترش کاربرد مس و آلیاژهای آن به عنوان یک فلز سازه‌ای در بیشتر زمینه‌های صنعتی، تقاضا برای جوش‌کاری آن با یک روش مناسب نیز افزایش یافته است [1]. به عنوان مثال، مس در تولید کانال‌ها و مجاری استفاده می‌شود [2] و یا به دلیل مقاومت در برابر خوردگی بالا، در صنعت خطوط لوله آب مورد استفاده قرار می‌گیرد [3]. بنابراین، فلز مس برای مطالعه حاضر انتخاب شده است. جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی (Friction Stir Welding) (FSW) به عنوان یک فرایند اتصال حالت جامد جدید، به طور گسترده‌ای برای اتصال مواد مختلف که جوش‌کاری ذوبی آنها با استفاده از روش‌های رایج دشوار است، استفاده می‌شود [4]. جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی که جایگزینی برای روش جوش‌کاری قوس الکتریکی معمولی است، دارای مزایای منحصر به فردی از جمله نیاز به آماده‌سازی سطح حداقل، راحتی کنترل پارامترهای جوش‌کاری و قابلیت اتصال فلزات مشابه یا غیر مشابه که اغلب به سختی جوش داده می‌شوند، است [5]. همچنین، این روش جوش‌کاری زمان جوش کوتاهی دارد و به راحتی می‌توان آن را خودکار کرد [6]. این

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۹/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۳/۲۷ می‌باشد.

(۱) استادیار، گروه مهندسی مواد، مجتمع آموزش عالی گناباد،گناباد، ایران.
(۲) استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.
(۳) نویسنده مسئول: گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. **Email**: a.shirazi.h@gmail.com
(۴) دانش آموخته کارشناس ارشد، مجتمع پسرانه سما اسلامشهر، اسلامشهر، تهران، ایران.

روش برای جوش‌کاری قطعات آلومینیومی ابداع شد، اما استفاده از آن به سرعت برای بسیاری از مواد دیگر مانند سوپر آلیاژها [7]، مس و آلیاژهای آن [8]، انواع فولاد [9]، تیتانیوم و آلیاژهای آن [10]، بسیاری از انواع مواد پلیمری [11] و هم‌چنین مواد ترموپلاستیک [12] توسعه یافت. روش جوش‌کاری FSW را می‌توان برای اتصال قطعات مواد مختلف به یکدیگر [13] استفاده نمود. این رویکرد جدید جوش‌کاری توسط مؤسسه جوش‌کاری (The Welding Institute) (TWI) در انگلستان در سال ۱۹۹۱ ابداع و معرفی شد [14].

پژوهش‌های متعددی در زمینه مطالعه فرایند جوش‌کاری به-روش اصطکاکی اغتشاشی انجام شده است. سان و فوجی [15]، اثر افزودن ذرات SiC بر استحکام کششی جوش‌های اصطکاکی اغتشاشی را بررسی کردند. آنها دریافتند که در یک پاس جوش، استحکام نهایی اتصالات جوش به دلیل ذرات SiC اضافه شده، کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش تعداد پاس‌های جوش‌کاری، ذرات SiC اضافه شده می‌توانند در منطقه اغتشاشی، بهتر پراکنده شوند و استحکام جوش را در مقایسه با شرایط جوش تک‌پاس افزایش دهند. یعقوبی و شیرازی [6]، ورق‌های مسی را با سرعت‌های مختلف ابزار جوش‌کاری به هم جوش دادند و خواص جوش‌های حاصل را بررسی نمودند. بر اساس مطالعات ایشان، در ناحیه متأثر از گرما، نرخ رشد ترک خستگی دارای بیشترین مقدار خود است. همچنین، با افزایش تعداد پاس‌های جوش‌کاری، مقاومت به خوردگی (Corrosion) در ناحیه اغتشاشی افزایش می‌یابد. کحال و همکاران [17]، با استفاده از روش تاگوچی، خواص مکانیکی جوش‌های اصطکاکی اغتشاشی را بهینه نمودند. ایشان متغیرهایی همچون قطر پین ابزار، سرعت دورانی، سرعت پیشروی و زاویه انحراف را به‌عنوان متغیرهای فرایند در نظر گرفتند و سه کمیت استحکام نهایی، چقرمگی و سختی در منطقه متأثر از حرارت و کار مکانیکی را بهینه نمودند.

در پژوهش حاضر، در ابتدا ورق‌های مسی به روش جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی و با سرعت‌های مختلف دورانی و جابه‌جایی ابزار و تعداد پاس مختلف، به یکدیگر جوش داده می‌شوند. به منظور جلوگیری از اکسید شدن جوش‌ها، این جوش‌کاری‌ها تحت گاز هلیوم انجام می‌شوند. دمیدن این گاز نجیب در حین جوش‌کاری بر روی ابزار و قطعه‌کار، سبب می‌شود که از رسیدن اکسیژن به محل جوش جلوگیری شود و اکسیدن شدن جوش‌ها اتفاق نیفتد چرا که افزایش دما و اکسید شدن جوش باعث تضعیف خواص جوش می‌شود. همچنین ممکن است که ابزار نیز دچار اکسایش شود و دقت خود را از دست بدهد و یا حتی از بین برود. در مرحله بعد، خواص جوش‌هایی که با شرایط مختلف مذکور حاصل شدند، شامل خواص کششی، سختی ویکرز و چقرمگی شکست و نیز خواص ریزساختاری آنها تعیین می‌شوند و این امکان را می‌دهند تا با مقایسه نتایج به دست آمده در این تحقیق و نتایج موجود دیگر در این زمینه، اثر استفاده از گاز هلیوم در جوش‌کاری به عنوان یک گاز محافظ بهتر درک شود.

مواد و روش‌ها

جوش‌کاری‌ها

همان طور که قبلا ذکر شد، در این تحقیق از مس خالص استفاده شده است. ترکیب شیمیایی این فلز با توجه به آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر مطابق جدول (۱) می‌باشد.

صفحات مسی با ابعاد ۵۰ میلی‌متر در ۱۱۰ میلی‌متر از یک ورق بزرگ به ضخامت ۵ میلی‌متر در راستای عمود بر جهت نورد بریده شده‌اند. هر دو نیمه قطعه‌کار، سمباده زده شده و صیقلی شده‌اند. این فرایندها برای جلوگیری از ایجاد حباب‌های هوا در محل جوش‌کاری ضروری می‌باشند؛ چرا که در غیر این صورت، حباب‌های هوای به دام افتاده، می‌توانند جوش‌های نهایی را تضعیف نمایند. صفحات مسی اولیه و قالب و متعلقات آن در شکل (۱) نشان داده شده است. قطعه‌کار نشان داده شده در این شکل، یک بار از قبل جوش داده شده و ابزار، برای بار دوم در حال جوش دادن آن است (جوش‌کاری دو پاس).

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فلز مس مورد استفاده

Cu	Pb	Sn	P	Mn	Al	Fe	Ni	Cr	Co	Zn
ماده پایه	<۰/۰۱	<۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۱	ناچیز	۰/۰۱	<۰/۰۰۴	<۰/۰۰۱	۰/۰۱	<۰/۰۲



شکل ۱ صفحات مسی اولیه و قالب و متعلقات آن

تقریبا در تمام انواع جوش‌کاری، پدیده اکسیداسیون یکی از موارد نامطلوب است. بنابراین، همان طور که شکل (۱) نشان می‌دهد، برای محافظت از ناحیه جوش و ابزار پین، گاز محافظ در طول فرایند جوش‌کاری با استفاده از شیلنگ گاز بر روی آن‌ها دمیده می‌شود. در این مطالعه، از گاز هلیوم خالص به‌عنوان گاز محافظ برای محافظت از ناحیه جوش‌کاری و ابزار جوش‌کاری در مقابل اکسیداسیون استفاده شده است.

در این تحقیق، برای بررسی تأثیر پارامترهای مورد نظر بر روی خواص جوش، فرایندهای جوش‌کاری مطابق با شرایط ذکر شده در جدول (۲) انجام شده‌اند. فرایند جوش‌کاری با ابزاری متشکل از شانه به قطر ۲۰ میلی‌متر، پین به قطر ۸ میلی‌متر و طول ۴/۷۵ میلی‌متر، انجام شده است. زاویه تورب بین جهت عمودی و محور ابزار نیز ۲ درجه در نظر گرفته شده است. منظور از زاویه تورب، زاویه میان محور ابزار و خط عمود بر صفحه مسی (قطعه‌کار) است. این زاویه معمولا بین ۲ تا ۴ درجه در نظر گرفته می‌شود. وجود زاویه تورب سبب می‌شود که بخش عقبی شانه ابزار در قطعه‌کار فرو رود و ماده را به سمت پایین فشار دهد. به این ترتیب فرایند فرجینگ اتفاق می‌افتد. لازم به یادآوری است که جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی ترکیبی از فرایند روزن‌رانی و فرایند فرجینگ است.

شایان ذکر است که اساس انتخاب پارامترهای جوشکاری، این بوده است که جوش‌های تولید شده توسط آنها بدون عیب و مطلوب (حداقل از لحاظ ظاهری) باشند. اما، چون این پارامترها در بازه نسبتا کوچکی قرار می‌گیرند، نمی‌توان محدوده آنها را خیلی بزرگ در نظر گرفت چرا که اگر این پارامترها خیلی تغییر کنند سبب ایجاد عیوبی در جوش‌های حاصل، می‌شوند. به همین علت در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده، تعداد پارامترهای در نظر گرفته شده تقریبا به همین تعداد می‌باشند.

جدول ۲ شرایط جوش‌کاری مختلف مورد استفاده در مطالعه حاضر

حالت‌های مختلف جوش‌کاری	سرعت دورانی (rpm)	سرعت جابه‌جایی (mm/min)
حالت یک	۵۵۰	۵۰
حالت دو	۵۵۰	۱۰۰
حالت سه	۸۵۰	۵۰
حالت چهار (دو پاس)	۵۵۰	۵۰

تعیین مناطق جوش و اندازه دانه‌ها

اگر چه جوش‌کاری اغتشاشی اصطکاکی در حالت جامد انجام می‌شود (بدون ذوب ماده) اما به علت انتقال گرما به قطعه‌کار و تغییر شکل‌های بزرگ، ریزساختار ماده دچار تغییرات قابل توجهی می‌شود که خواص آن را دست‌خوش تغییر می‌کند. این عوامل، یعنی گرما و تغییر شکل‌های بزرگ باعث به وجود آمدن سه ناحیه مختلف در خط جوش می‌شوند. این نواحی عبارتند از ناحیه متأثر از گرما (Heat Affected Zone) (HAZ)، ناحیه متأثر از کار مکانیکی و گرما (Thermo-Mechanical Affected Zone) (TMAZ) و ناحیه اغتشاشی (Stir Zone) (SZ).

ناحیه متأثر از گرما: ناحیه متأثر از گرما، دو ناحیه مجزا در دو طرف خط جوش می‌باشد که یک چرخه گرمایی را در حین فرایند جوش‌کاری تجربه می‌کنند. گرمای انتقالی به این ناحیه سبب می‌شود که دانه‌بندی آن اندکی درشت‌تر شود و دانه‌ها به طور کامل و یا جزئی به یکدیگر بپیوندند.

ناحیه متأثر از کار مکانیکی و گرما: تغییراتی که در این ناحیه از جوش نسبت به ماده پایه به وجود می‌آید نشئت گرفته از تغییر شکل‌های خمیری ایجاد شده توسط ابزار و نیز گرمای فرایند جوش‌کاری می‌باشد. این ناحیه خود به دو قسمت تقسیم می‌شود. ناحیه‌ای که در آن دانه‌بندی مجدد رخ می‌دهد و نیز ناحیه‌ای که در آن دانه‌بندی مجدد رخ نمی‌دهد.

ناحیه اغتشاشی: بخشی از ناحیه متأثر از کار مکانیکی و گرما است که دچار دانه‌بندی مجدد می‌شود. این بخش در واقع ناحیه‌ای است که بزرگ‌ترین تغییر شکل‌ها در آن رخ می‌دهد.

به‌منظور تعیین اندازه دانه‌ها و سه ناحیه جوش (ناحیه اغتشاشی، ناحیه متأثر از کار مکانیکی و گرما و ناحیه تحت تأثیر گرما)، صفحات مسی جوش داده شده در جهت عمود بر راستای جوش، برش داده شدند. پس از برش، سطح مقطع نمونه‌ها با دقت سمباده زده شده، صیقل خورده و سپس اچ (Etching) شدند. محلول مناسب برای اچ کردن فلز مزبور شامل ۳۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک، ۱۰ گرم کلرید آهن، ۶۰ میلی‌لیتر آب مقطر و ۶۰ میلی‌لیتر اتانول می‌باشد. پس از انجام فرایند اچ، سه ناحیه مختلف جوش‌کاری توسط میکروسکوپ نوری شناسایی شدند. این مناطق برای تمام شرایط جوش‌کاری ذکر شده در جدول (۲) تعیین گردیدند. علاوه بر این، اندازه دانه ناحیه اغتشاشی و اندازه دانه متأثر از گرما برای هر یک از شرایط جوش‌کاری مشخص شدند.

میکروسختی ویکرز

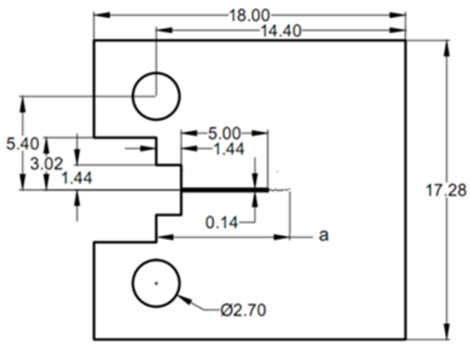
برای تعیین پروفیل‌های سختی ویکرز جوش‌ها، از استاندارد ASTM E92 استفاده شده است [18]. بر اساس این استاندارد، بار ۲۰۰gf به خط میانی هر نمونه جوش داده شده (در راستای ضخامت) در مدت ۱۵ ثانیه اعمال شد و بدین ترتیب مقادیر سختی ویکرز برای ناحیه اغتشاشی و اندازه دانه متأثر از گرما برای تمام شرایط جوش‌کاری و هم‌چنین برای فلز پایه به دست آمدند. برای آن که نتایج به دست دارای دقت کافی باشند، در هر حالت و در هر ناحیه، سختی ویکرز پنج نقطه اندازه‌گیری شده و سپس از نتایج مربوطه میانگین‌گیری شده است.

خواص کششی

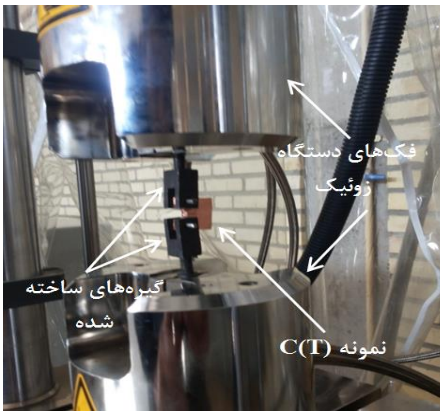
آزمایش‌های کششی با استفاده از دستگاه کشش زوئیک (Zwick) ۲/۵ تن با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه در دمای محیط انجام شدند. نمونه‌های کششی از صفحات جوش داده شده در امتداد جهت عمود بر خط جوش و بر اساس استاندارد ASTM E8 بریده شدند [19]. همچنین، بعد از انجام آزمایش‌های کشش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، سطوح شکست نمونه‌های کششی مورد بررسی قرار گرفتند. در این دسته از آزمایش‌ها، برای هر حالت جوش‌کاری سه نمونه آزمون کشش تهیه شده و تحت آزمون قرار گرفت و از نتیجه‌هایی که به دست آمدند، میانگین گرفته شد.

چقرمگی شکست

برای تعیین چقرمگی شکست از استاندارد ASTM E1820 استفاده شده است. این استاندارد توصیه می‌کند که برای تعیین چقرمگی شکست، به جای نمونه‌های ضریب شدت تنش بحرانی K_{IC}، از نمونه‌های انتگرال–J استفاده شود [20]. انتگرال–J، یک انتگرال خطی (مستقل از مسیر) در اطراف نوک ترک است که در مبحث مکانیک شکست اهمیت زیادی دارد. استفاده از نمونه‌های K_{IC} برای تعیین چقرمگی شکست، زمانی مناسب است که حالت کرنش صفحه‌ای حاکم باشد. در نمونه‌های جوش داده شده، چون محدودیت ضخامت وجود دارد، نمی‌توان از این کمیت استفاده کرد. بنابراین، استاندارد اجازه می‌دهد که برای این منظور از نمونه‌های تعیین انتگرال–J استفاده شود. به همین دلیل، از نمونه‌های C(T) تعیین انتگرال–J استفاده شده است. ابعاد این نمونه‌ها در شکل (۲–الف) آورده شده‌اند. با توجه به اهمیت بالای ناحیه اغتشاشی و ناحیه متأثر از گرما، در بسیاری از مطالعات، خواص این ناحیه‌ها از جمله چقرمگی شکست این نواحی مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، در تحقیق حاضر، نمونه‌های C(T) به‌گونه‌ای از قطعه‌کارهای مسی جوش داده شده برش داده شدند که شکاف نمونه‌های مذکور در ناحیه اغتشاشی و یا در ناحیه متأثر از گرما قرار گیرد. نمونه‌های C(T) از فلز پایه نیز تهیه شدند تا به کمک آنها بتوان چقرمگی ماده پایه را نیز اندازه گرفت و با چقرمگی نواحی مختلف جوش مقایسه نمود. قبل از اعمال نیروی کششی به نمونه‌های C(T) و تعیین نمودارهای نیرو–جابه‌جایی آنها، این نمونه‌ها تحت بارگذاری خستگی قرار گرفتند؛ به طوری که یک پیش‌ترک در انتهای بریدگی آنها ایجاد شد. طول این پیش ترک طبق توصیه استاندارد ASTM E1820 حداقل ۰/۶ میلی‌متر است. بارهای خستگی نیز با استفاده از دستگاه کشش زوئیک ۲/۵ تن اعمال شدند. در این تحقیق، برای آنکه بتوان نمونه‌های C(T) را به فک‌های دستگاه بست، گیره‌های ویژه‌ای ساخته شدند. تصویر این گیره‌های ساخته شده، نمونه C(T) تحت آزمایش و فک‌های دستگاه زوئیک در شکل (۲–ب) نشان داده شده‌اند. شایان ذکر است که برای حصول دقت بیشتر در نتایج به دست آمده، در هر حالت جوش‌کاری، سه نمونه C(T) ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته و سپس، از داده‌های به دست آمده میانگین‌گیری شده است.



(الف)



(ب)

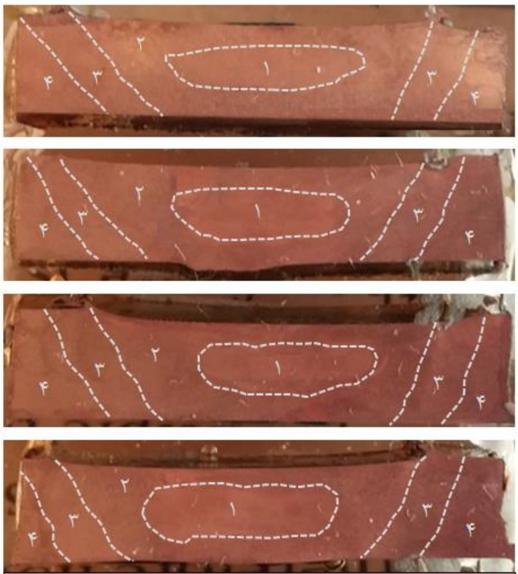
شکل ۲ عملیات مربوط به انجام آزمایش نمونه C(T): الف) ابعاد نمونه‌های C(T) و ب) یک نمونه C(T) که توسط گیره‌های ساخته شده، بر روی دستگاه زوئیک بسته شده است

نتایج و بحث

ریزساختار

سطح مقطع برش خورده جوش‌های به دست آمده در شرایط جوش‌کاری مختلف در شکل (۳) نشان داده شده‌اند. در این شکل، نواحی مختلف ایجاد شده در خط جوش‌ها نیز که با استفاده از میکروسکوپ نوری مشخص شده‌اند، به چشم می‌خورند. این نواحی شامل ناحیه اغتشاشی، ناحیه متأثر از گرما و کار مکانیکی و نیز ناحیه متأثر از گرما می‌باشند. شکل (۳) نشان می‌دهد که در حالت سوم جوش‌کاری، ناحیه اغتشاشی به سمت راست متمایل شده است. در واقع این سمت، سمت پیشرو جوش است که سرعت ابزار در آن بیشتر از سرعت سمت پسرو می‌باشد. با توجه به اینکه در حالت سه جوش‌کاری، سرعت دورانی ابزار برابر ۸۵۰rpm است و نسبت به سایر حالت‌ها سرعت بیشتر می‌باشد، لذا در این حالت ناحیه اغتشاشی به سمت راست متمایل می‌شود. لازم به ذکر است که در جوش‌کاری حالت سه، علاوه بر اینکه ناحیه اغتشاشی تمایل بیشتری به سمت پیشروی دارد، کل این ناحیه نیز کمی به سمت طرف پیشرو منتقل شده است. دلیل این پدیده، سرعت چرخش بیشتر در سمت پیشرو نیز می‌باشد.

(الف)
(ب)
(پ)
(ت)



۱: ناحیه اغتشاشی، ۲: ناحیه متأثر از گرما و کار مکانیکی، ۳: ناحیه متأثر از گرما، ۴: ماده پایه

شکل ۳ نواحی مختلف حاصل از جوش‌کاری در حالت‌های مختلف: الف) حالت یک، ب) حالت دو، پ) حالت سه و ت) حالت چهار

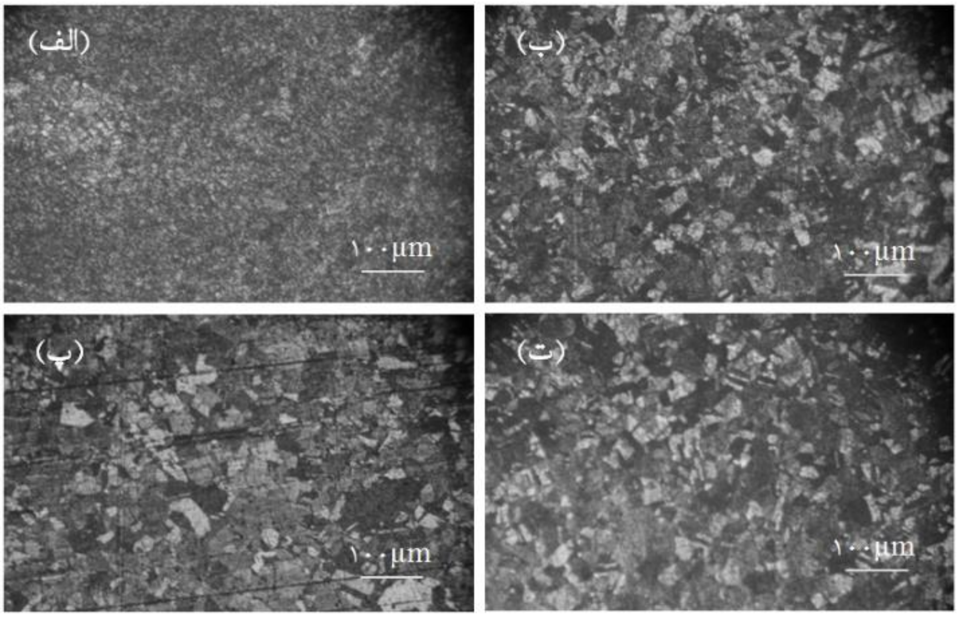
در جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی، ناحیه متأثر از گرما و کار مکانیکی، یک ناحیه انتقالی بین ناحیه اغتشاشی و ناحیه متأثر از گرما است و خواص آن بین خواص این دو ناحیه می‌باشد. این موضوع به‌ویژه در مورد اندازه دانه‌ها و خواص کششی این نواحی صدق می‌کند. بر اساس این واقعیت، در تحقیق حاضر بیشتر به خواص ریزساختاری و مکانیکی ناحیه اغتشاشی و ناحیه متأثر از گرما توجه شده است. بنابراین، اندازه دانه آنها توسط یک میکروسکوپ نوری با استفاده از روش تقاطع خطوط (Intercept method) مشخص شده و در جدول (۳) ارائه شده‌اند. به‌عنوان نمونه، تصاویر ریزساختار و دانه‌بندی فلز پایه، ناحیه متأثر از گرما، ناحیه متأثر از گرما و کار مکانیکی و ناحیه اغتشاشی برای شرایط جوش ۱، به‌عنوان شرایط جوش پایه در شکل (۴) نشان داده شده است.

تمامی اندازه‌هایی که در جدول (۳) ارائه شده‌اند، با توجه به

نرخ انتقال گرما به نمونه‌ها در تمامی حالات جوش‌کاری و توجه به این نکته که کاهش سرعت چرخشی ابزار باعث کاهش سرعت انتقال گرما به نمونه‌های جوش شده می‌شود و همچنین، کاهش سرعت انتقالی ابزار باعث افزایش سرعت انتقال حرارت به نمونه‌ها می‌گردد، قابل توجیه هستند. مقایسه بین حالات جوش‌کاری ۱ و ۲ که سرعت چرخشی آنها یکسان و سرعت انتقال آنها متفاوت است، نشان می‌دهد که افزایش سرعت انتقالی منجر به کاهش اندازه دانه در ناحیه اغتشاشی و ناحیه متأثر از گرما می‌شود. همچنین، با مقایسه حالات جوش‌کاری ۱ و ۳ می‌توان دریافت که افزایش سرعت چرخشی ابزار منجر به رشد قابل توجه دانه در هر دو ناحیه ذکر شده، به ویژه در ناحیه اغتشاشی می‌شود. در نهایت، مقایسه حالت جوش‌کاری ۱ و حالت جوش‌کاری ۴ که برای بررسی تأثیر تعداد پاس‌های جوش‌کاری بر رفتار جوش‌ها انجام شده است، نشان می‌دهد که اندازه دانه‌های ناحیه اغتشاشی در شرایط جوش ۴ کوچک‌تر از اندازه دانه‌های ناحیه اغتشاشی در حالت جوش‌کاری ۱ است. دلیل این امر آن است که پدیده تبلور مجدد دو بار در منطقه اغتشاشی در شرایط جوش‌کاری ۴ رخ داده است. از طرف دیگر، اندازه دانه‌های ناحیه متأثر از گرما در حالت جوش‌کاری ۴ بزرگ‌تر از اندازه دانه‌های ناحیه متأثر از گرما در حالت جوش ۱ است؛ چون در ناحیه متأثر از گرمای حالت جوش‌کاری ۴، پدیده آنیل شدن دو بار رخ داده است، بنابراین اندازه دانه‌ها بزرگ‌تر می‌باشد.

جدول ۳ اندازه دانه‌ها و تغییرات آنها نسبت به فلز پایه برای ناحیه متأثر از گرما و ناحیه اغتشاشی برای حالت‌های مختلف جوش‌کاری

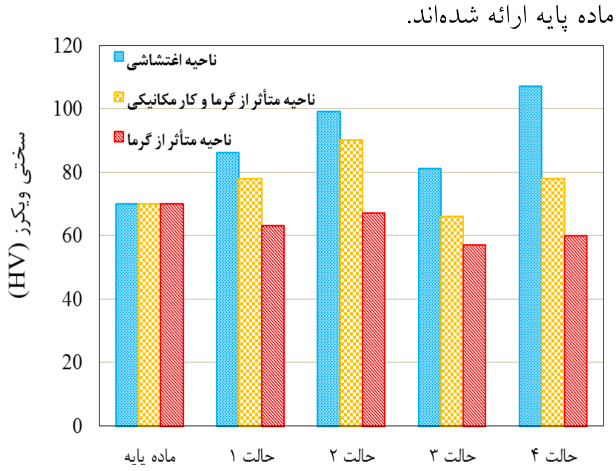
حالت‌های مختلف جوش‌کاری	ناحیه متأثر از گرما		ناحیه اغتشاشی	
	اندازه دانه (μm)	تغییرات نسبت به ماده پایه (٪)	اندازه دانه (μm)	تغییرات نسبت به ماده پایه (٪)
حالت یک	۱۷/۹±۱/۲	۱۷/۸	۴/۹±۰/۳۲	−۶۷/۸
حالت دو	۱۶/۵±۰/۷	۸/۶	۳/۴±۰/۱۵	−۷۷/۶
حالت سه	۲۱/۷±۱/۹	۴۲/۸	۱۱/۴±۰/۸۴	−۲۵/۰
حالت چهار	۲۰/۸±۱/۷	۳۶/۸	۲/۷±۰/۰۸	−۸۲/۲
ماده پایه	۱۵/۲±۰/۸	−	۱۵/۲±۰/۸	−



شکل ۴ تصاویر ریزساختارهای: الف) ناحیه اغتشاشی، ب) ناحیه متأثر از گرما و کار مکانیکی، پ) ناحیه متأثر از گرما و ت) ماده پایه برای شرایط جوش‌کاری ۱

سختی ویکرز

به‌منظور تعیین اثر حالت‌های مختلف جوش‌کاری بر مقادیر سختی و نیز تعیین سختی نواحی مختلف حاصل از جوش‌کاری، اندازه‌گیری‌های میکروسختی ویکرز انجام شد. داده‌های به دست آمده از این اندازه‌گیری‌ها در شکل (۵) برای نواحی مختلف و ماده پایه ارائه شده‌اند.



شکل ۵ مقادیر سختی ویکرز نواحی مختلف جوش برای حالت‌های مختلف جوش‌کاری

شکل (۵) نشان می‌دهد که به طور کلی، مقادیر سختی ویکرز جوش‌ها با افزایش سرعت انتقال گرما به نمونه‌ها در حالت‌های مختلف جوش‌کاری کاهش می‌یابد. بنابراین، حداقل سختی را می‌توان در حالت جوش‌کاری ۳ مشاهده کرد که سرعت چرخش ابزار ۸۵۰ دور در دقیقه است و بنابراین، گرمای قابل توجهی به صفحه جوش منتقل می‌شود. این موضوع برای هر سه ناحیه جوش صادق است. همچنین، در حالت ۲ که سرعت چرخشی ابزار ۵۵۰ دور در دقیقه و سرعت انتقالی آن ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه است (گرمای انتقال یافته به قطعه‌کار کمتر از سایر حالات جوش‌کاری می‌باشد)، مقادیر سختی اندازه‌گیری شده به نسبت زیاد است. این امر به دلیل تأثیر سرعت گرمای انتقال یافته به نمونه، بر اندازه دانه‌ها در شرایط مختلف جوش‌کاری قابل توجه است. بنابراین، به طور کلی می‌توان گفت که هر چه سرعت گرمای منتقل شده به نمونه بیشتر باشد، اندازه دانه بزرگ‌تر و سختی ویکرز نیز کمتر است. علاوه بر این، شکل (۵) نشان می‌دهد که حداکثر مقدار سختی در ناحیه اغتشاشی مربوط به حالت جوش‌کاری ۴ است. دلیل این امر، وقوع دو بار تبلور مجدد و ریز شدن زیاد دانه‌ها در این ناحیه می‌باشد؛ اگر چه به دلیل عملکرد دو پاس جوش، پدیده رشد دانه نیز دو بار در ناحیه متأثر از گرما رخ می‌دهد و در نتیجه سختی ویکرز در حالت جوش‌کاری ۴ کمتر از سختی این ناحیه در حالت جوش‌کاری ۱ است. همان طور که انتظار می‌رود، در تمام حالت‌های جوش‌کاری، مقادیر سختی ناحیه متأثر از گرما و کار مکانیکی بین مقادیر سختی ناحیه اغتشاشی و ناحیه متأثر از گرما است (بر اساس شکل ۵). علت اینکه در ناحیه متأثر از گرما مقدار سختی کاهش پیدا می‌کند آن است که در این ناحیه به علت آنیل شدن ماده، دانه‌بندی درشت‌تر شده و ماده نرم‌تر می‌شود، لذا سختی آن کاهش می‌یابد. روشن است که هر چه مقدار گرمای منتقل شده به قطعه‌کار بیشتر باشد، شدت آنیل شدن نیز بیشتر خواهد بود و لذا ماده نرم‌تر می‌شود.

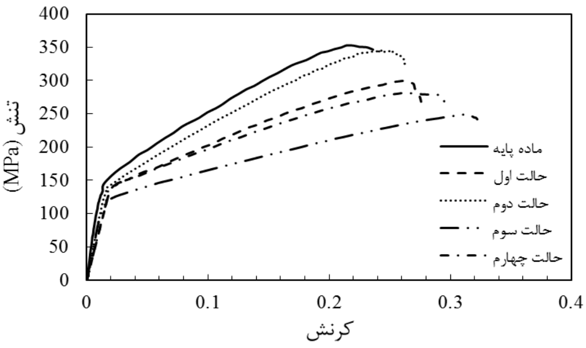
خواص کششی

منحنی‌های تنش ـ کرنش حقیقی فلز پایه و نمونه‌های آزمون کشش ساخته شده از ورق‌هایی که با حالات مختلف جوش‌کاری به یکدیگر متصل شده‌اند، در شکل (۶) نشان داده شده است. هم‌چنین، شکل (۷) نمونه‌های گسیخته شده را بعد از انجام آزمون کشش برای شرایط حالت‌های جوش‌کاری ۱ تا ۴ نشان می‌دهد. تصاویر شکل (۷) نشان می‌دهند که تمام نمونه‌های آزمایش کشش ساخته شده از ورق جوش داده شده، از ناحیه متأثر از گرما شکسته شده‌اند. شکل (۵) نیز نشان داد که ناحیه متأثر از گرما، کمترین سختی را در بین تمامی مناطق جوش‌کاری دارد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که ناحیه متأثر از گرما، ضعیف‌ترین ناحیه جوش است. سایر محققان نیز نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند [21,22]. دلیل این ضعف، رشد دانه‌ها در این منطقه است. این پدیده به‌علت فرایند آنیل شدن رخ داده است که دلیل آن اعمال گرما به این ناحیه، یعنی ناحیه متأثر از گرما در حین انجام جوش‌کاری است.

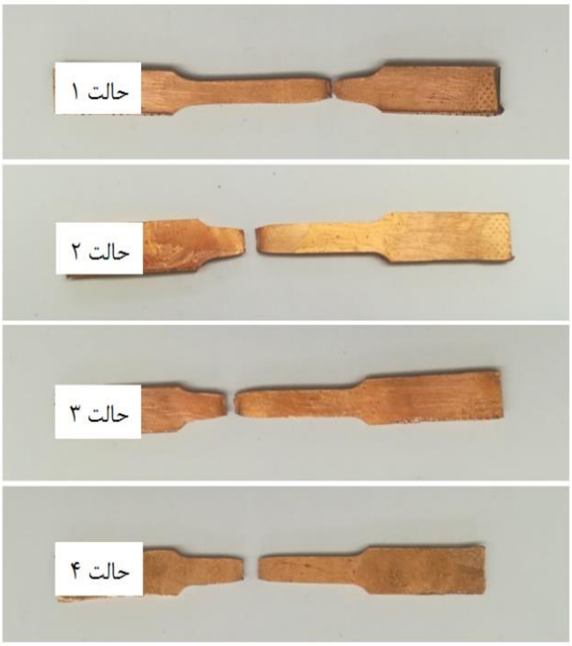
به منظور مقایسه آسان‌تر خواص کششی فلز پایه و جوش‌ها، نتایج به دست آمده از آزمون‌های کشش در قالب جدول (۴) ارائه شده‌اند. این جدول نشان می‌دهد که بیشترین تنش تسلیم و استحکام نهایی متعلق به فلز پایه است؛ در حالی که میزان کرنش گسیختگی آن از همه کمتر است. علت این امر، وقوع پدیده آنیل شدن در ناحیه متأثر از گرما در نمونه‌های جوش داده شده است. این پدیده به طور کلی منجر به کاهش استحکام کششی و افزایش کرنش گسیختگی می‌شود.

همان طور که انتظار می‌رود، بر اساس مقایسه اندازه دانه‌های ذکر شده در جدول (۳)، بیشترین تنش تسلیم و بالاترین استحکام

نهایی ارائه شده در جدول (۴)، متعلق به ماده پایه است. پس از این مقادیر، خواص کششی حالت جوش‌کاری ۲، حالت جوش‌کاری ۱، حالت جوش‌کاری ۴ و حالت جوش‌کاری ۳ ذکر شده است. همان طور که قبلا نیز ذکر شد، گسیختگی نمونه‌های آزمون کشش در ناحیه متأثر از گرما رخ می‌دهد. به منظور حصول درک بهتری از این گسیختگی‌ها، از سطوح شکست ایجاد شده در نمونه‌های ساخته شده از ماده پایه و نمونه‌های مربوط به حالت‌های ۲ و ۳ جوش‌کاری، عکس‌های SEM تهیه شده است که این عکس‌ها را می‌توان در شکل (۸) مشاهده نمود. از آنجایی که مس یک فلز شکل‌پذیر است، سطوح شکستگی دارای حفره‌های (Dimples) میکروسکوپی هستند. وجود این حفره‌ها بیانگر وقوع یک شکست نرم هستند. این حفره‌ها را می‌توان به وضوح در تصاویر SEM ارائه شده تشخیص داد.



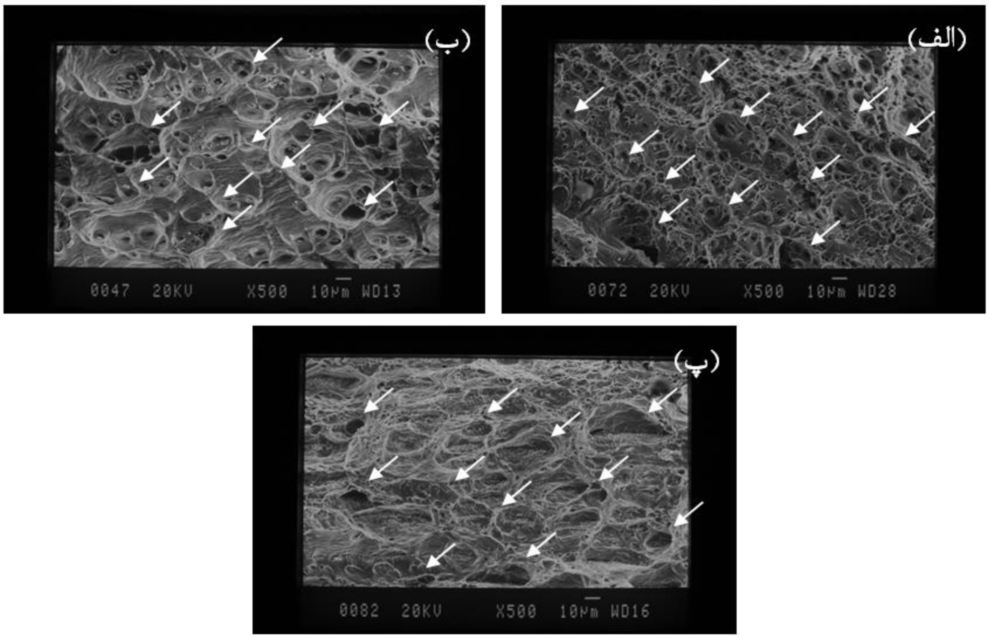
شکل ۶ منحنی‌های تنش ـ کرنش حقیقی ماده پایه و حالت‌های مختلف جوش‌کاری



شکل ۷ نمونه‌های آزمایش کشش بعد از گسیخته شدن برای حالت‌های جوش‌کاری ۱ تا

جدول ۴ خواص کششی جوش‌ها و فلز پایه

حالت جوش‌کاری	تنش تسلیم (MPa)	تغییرات نسبت به فلز پایه (٪)	استحکام نهایی (MPa)	تغییرات نسبت به فلز پایه (٪)	کرنش گسیختگی	تغییرات نسبت به فلز پایه (٪)
حالت یک	۱۵۷±۱۲	−۸/۷	۳۰۹±۲۱	−۱۶/۰	۰/۲۹±۰/۰۲۵	۱۱/۵
حالت دو	۱۶۱±۱۳	−۶/۴	۳۵۴±۱۹	−۳/۸	۰/۲۷±۰/۰۲۱	۳/۸
حالت سه	۱۳۴±۱۰	−۲۲/۱	۲۴۳±۱۷	−۳۳/۹	۰/۳۵±۰/۰۲۹	۳۴/۶
حالت چهار	۱۴۸±۹	−۱۳/۹	۲۷۸±۲۴	−۲۴/۴	۰/۳۱±۰/۰۱۸	۱۹/۲
ماده پایه	۱۷۲±۱۶	−	۳۶۸±۳۵	−	۰/۲۶±۰/۰۱۶	−



شکل ۸ تصاویر SEM سطوح شکست نرم برای الف) فلز پایه، ب) حالت جوش‌کاری ۲ و پ) حالت جوش‌کاری ۳

شکل (۸) نشان می‌دهد که حفره‌های سطوح شکست نمونه‌های جوش داده شده (شکل‌های ۸ ـ ب و ۸ ـ پ) بزرگ‌تر از حفره‌های سطح شکست فلز پایه (شکل ۸ ـ الف) است. این امر به این دلیل است که دانه‌ها در ناحیه متأثر از گرما به‌علت انجام فرایند جوش‌کاری رشد می‌کنند. لذا، به دلیل وجود دانه‌های درشت‌تر، حفره‌های ایجاد شده نیز درشت‌تر هستند. علاوه بر این، مقایسه شکل‌های (۸ ـ ب) و (۸ ـ پ) نیز نشان می‌دهد که حفره‌های ایجاد شده در سطح شکست حالت جوش‌کاری ۳، بزرگ‌تر از حفره‌های ایجاد شده در سطح شکست حالت جوش‌کاری ۲ می‌باشند. دلیل این امر آن است که در حالت جوش‌کاری ۳، سرعت چرخشی ابزار ۸۵۰ دور در دقیقه و سرعت انتقالی آن ۵۰ میلی‌متر در دقیقه است، در حالی‌که در حالت ۲ سرعت چرخشی ۴۰۰ دور در دقیقه و سرعت انتقالی نیز ۱۰۰ میلی‌متر در دقیقه می‌باشد. این دو عامل، یعنی سرعت چرخشی بیشتر و سرعت انتقالی کوچک‌تر ابزار در حالت ۳، منجر به انتقال حرارت بیشتر به صفحات مسی در فرایند جوش‌کاری می‌شود. بنابراین، در ناحیه متأثر از گرما در حالت جوش‌کاری ۳، رشد اندازه دانه بیشتری رخ می‌دهد. دانه‌ها در حالت ۳ بزرگ‌تر شده و در نتیجه حفره‌های ناشی از شکستگی نرم نیز بزرگ‌تر می‌گردند. در واقع، گرمای منتقل شده به این ناحیه، منجر به ایجاد دانه‌هایی با ابعاد بزرگ‌تر و در نتیجه تنزل خواص مکانیکی می‌گردد. همان طور که شکل (۶) نشان داده شد، منحنی تنش ـ کرنش ماده پایه بالاتر از منحنی‌های دیگر قرار دارد و نمودار مربوط به حالت جوش‌کاری ۲ نسبت به سایر نمودارها به آن نزدیک‌تر است. علاوه بر این، منحنی تنش ـ کرنش حالت جوش‌کاری ۳، که در آن سرعت چرخش ابزار بزرگ‌ترین و سرعت انتقالی آن کوچک‌ترین است، پایین‌تر از سایر نمودارها قرار گرفته است. این تغییرات به‌دلیل وقوع بیشترین آنیل شدن در این حالت است. لذا، منحنی‌های تنش ـ کرنش حالات جوش ۱ و ۴ بین حالات ۲ و ۳ قرار دارند. هم‌چنین، مقایسه بین حالات جوش‌کاری ۱ و ۴ نشان می‌دهد که از آنجایی که در حالت جوش ۴ پدیده آنیل شدن دو بار رخ می‌دهد، نمودار تنش ـ کرنش مربوط به حالت جوش‌کاری ۴ پایین‌تر از منحنی مربوط به حالت ۱ جوش‌کاری است. به همین دلیل، می‌توان نتیجه گرفت که برای به دست آوردن خواص کششی بهتر، به جای افزایش تعداد پاس‌های جوش، بهتر است که فرایند جوش‌کاری را در دمای پایین‌تری انجام داد.

چقرمگی شکست

پس از ایجاد پیش‌ترک خستگی، تمام نمونه‌های C(T) با استفاده از دستگاه کشش زوئیک ۲/۵ تنی کشیده شده‌اند. با انجام این کار، نمودارهای نیرو ـ جابه‌جایی این نمونه‌ها تعیین شدند. این

نمودارها در شکل (۹) ارائه شده است. برای به دست آوردن مقادیر انتگرال-J، می‌توان از معادله (۱) استفاده کرد [20]:

$$J=J_{el}+J_{pl} \quad (۱)$$

در این رابطه، J_{el} و J_{pl} به‌ترتیب بخش الاستیک و پلاستیک انتگرال-J هستند. این معادله را می‌توان به صورت زیر نیز بازنویسی نمود:

$$J=\frac{K^2(1-\nu^2)}{E}+J_{pl} \quad (۲)$$

در این معادله، K ضریب شدت تنش، ν نسبت پواسون و E مدول یانگ است. مقدار ضریب شدت تنش از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$K_{(i)}=\frac{P_i}{(BB_NW)^{1/2}}f\left(\frac{a_i}{W}\right) \quad (۳)$$

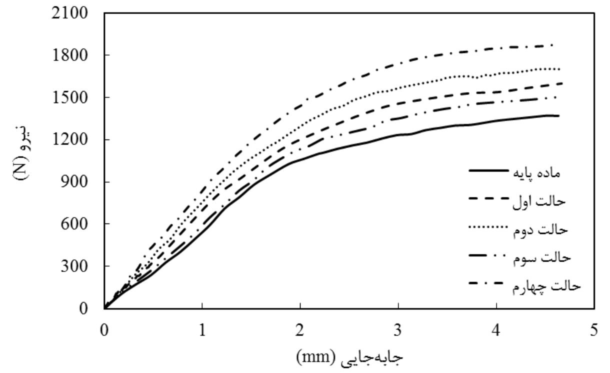
که در آن:

$$f\left(\frac{a_i}{W}\right)=\frac{\left(2+\frac{a_i}{W}\right)\left(0.886+4.64\left(\frac{a_i}{W}\right)-13.32\left(\frac{a_i}{W}\right)^2+14.72\left(\frac{a_i}{W}\right)^3-5.6\left(\frac{a_i}{W}\right)^4\right)}{\left(1-\frac{a_i}{W}\right)^{3/2}} \quad (۴)$$

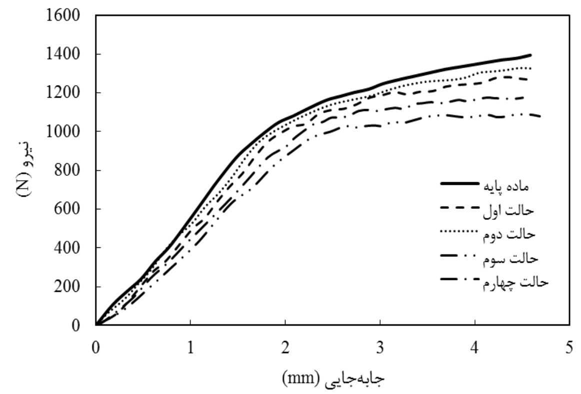
در معادلات (۳) و (۴)، P_i نیروی کششی اعمال شده به نمونه‌های C(T) در لحظه‌ای است که طول ترک برابر با a_i است. مقدار B ضخامت و B_N ضخامت خالص نمونه است که همان B در نمونه‌های مورد استفاده در این مطالعه است و همچنین W، عرض نمونه‌ها می‌باشد. در شکل (۹)، اگر فقط بخش الاستیک منحنی‌ها در نظر گرفته شود، مقادیر J_{IC} و K_{IC} را می‌توان با استفاده از معادله (۲) و معادله (۳) محاسبه نمود:

$$J_{IC}=\frac{K_{IC}^2(1-\nu^2)}{E} \quad (۵)$$

حداکثر مقادیر بار الاستیک (P_{el}) با توجه به شکل (۹) تعیین گردیده و در جدول (۵) گزارش شده است. هم‌چنین، بر اساس مقادیر به دست آمده برای بار الاستیک و با استفاده از معادله (۳) و معادله (۵)، مقادیر J_{IC} و K_{IC} برای حالت‌های جوش‌کاری مختلف برای ناحیه متأثر از گرما و ناحیه اغتشاشی نیز تعیین شده‌اند. این پارامترها با توجه به معادلات ذکر شده به دست آمده و در جدول (۵) ارائه شده‌اند. برای محاسبه این کمیت‌ها، مقادیر E و ν به ترتیب برابر ۱۱۹ گیگاپاسکال و ۰/۳۲۶ در نظر گرفته شده‌اند.



(الف)



(ب)

شکل ۹ نمودارهای نیرو ـ جابه‌جایی نمونه‌های C(T) برای حالت‌های مختلف جوش‌کاری: الف) ناحیه اغتشاشی و ب) ناحیه متأثر از گرما

جدول ۵ حداکثر مقادیر بارهای الاستیک و مقادیر به دست آمده برای J_{IC} و K_{IC}

شرایط جوش‌کاری	ناحیه اغتشاشی			ناحیه متأثر از دما		
	P_{el}(N)	J_{IC}(KJ/m۲)	K_{IC}(MPa$\sqrt{m}$)	P_{el}(N)	J_{IC}(KJ/m۲)	K_{IC}(MPa$\sqrt{m}$)
حالت یک	۱۲۳۷±۵۲	۴/۹۶	۲۵/۷۱	۹۸۷±۴۹	۳/۱۶	۲۰/۵۱
حالت دو	۱۳۳۵±۱۲۱	۵/۷۷	۲۷/۷۴	۱۰۱۷±۷۳	۳/۳۵	۲۱/۱۳
حالت سه	۱۱۱۳±۷۵	۴/۰۱	۲۳/۱۳	۹۳۲±۵۳	۲/۸۱	۱۹/۳۷
حالت چهار	۱۴۸۲±۱۲۷	۷/۱۱	۳۰/۷۹	۹۷۶±۶۱	۳/۰۸	۲۰/۲۸
ماده پایه	۱۰۴۷±۸۸	۳/۵۵	۲۱/۷۶	۱۰۴۷±۸۸	۳/۵۵	۲۱/۷۶

جدول (۵) نشان می‌دهد که در تمام شرایط جوشکاری، چقرمگی شکست ناحیه متأثر از گرما کمتر از چقرمگی شکست ماده پایه و چقرمگی شکست ناحیه اغتشاشی نیز بیشتر از چقرمگی شکست ماده پایه است. به عنوان نمونه، در شرایط جوش ۳، چقرمگی شکست ناحیه متأثر از گرما به میزان ۱۰/۹۸ درصد کاهش یافته و در شرایط جوش ۴، این مقدار برای ناحیه اغتشاشی حدود ۴۱/۴۹ درصد نسبت به فلز پایه افزایش یافته است.

در ناحیه متأثر از گرما، به دلیل اعمال گرما، مرز دانه‌ها در برخی از دانه‌ها به‌طور جزئی و یا کامل حذف شده و منجر به رشد دانه‌ها می‌شود. بنابراین، خواص مکانیکی ناحیه متأثر از گرما نسبت به فلز پایه تنزل می‌یابد. بدیهی است که این تغییرات به علت گرمای انتقال یافته به قطعه‌کار در طی فرایند جوشکاری است. از سوی دیگر، به دلیل تشکیل دانه‌های ریزتر در ناحیه اغتشاشی که به علت وقوع پدیده تبلور مجدد اتفاق می‌افتد، ناحیه اغتشاشی، ریزساختاری به شکل دانه‌های هم‌محور و دانه‌های کوچک خواهد داشت. در واقع، چقرمگی شکست، مقاومت یک ماده در برابر ایجاد و رشد ترک است و این مقدار به شدت به اندازه دانه‌های مواد بستگی دارد. در یک ماده مشخص، دانه‌های کوچک‌تر از دو جهت بهتر از دانه‌های بزرگ‌تر می‌توانند در برابر رشد ترک مقاومت کنند. اولا، زمانی که دانه‌ها کوچک هستند، تعداد آنها و در نتیجه تعداد مرزهای آنها بیشتر شده و در واقع، موانع بیشتری بر سر راه مسیر رشد ترک وجود دارد. مشخص است که مرز دانه‌ها به عنوان مانع مؤثر در مسیر رشد ترک عمل می‌کند. ثانیا، در یک ریزساختار با اندازه دانه‌های کوچک، ریزترک‌های ایجاد شده ریز و کوچک هستند و بنابراین، این ریزترک‌ها نمی‌توانند منجر به تمرکز تنش قابل توجهی شوند. در مقابل، زمانی که دانه‌ها درشت هستند، تمرکز تنش قابل توجه بوده و در ایجاد و گسترش ترک مؤثرتر است.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، صفحات مسی با استفاده از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تحت پارامترهای مختلف جوشکاری با استفاده از گاز محافظ هلیوم به هم متصل شده‌اند. هدف از انجام این مطالعه، بررسی خواص مکانیکی جوش شامل ریزسختی، خواص کششی، چقرمگی شکست و ریزساختار آنها است. با توجه به آنچه در این تحقیق مشاهده گردید، می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

۱. با انجام فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، خواص مکانیکی در ناحیه اغتشاشی بهبود پیدا می‌کند. افزایش تعداد مرزدانه‌ها و کاهش اثر تمرکز تنش باعث می‌شود که چقرمگی شکست در ناحیه اغتشاشی به‌میزان قابل توجهی افزایش یابد. به عنوان نمونه، در حالت جوشکاری ۴، با دو پاس جوشکاری، چقرمگی شکست ۴۱/۴۹ درصد نسبت به فلز پایه افزایش پیدا نمود.

۲. افزایش تعداد پاس‌های جوش باعث بهبود خواص مکانیکی ناحیه اغتشاشی می‌شود، اما خواص ناحیه متأثر از گرما را که ضعیف‌ترین ناحیه جوش است، کاهش می‌دهد. بر همین اساس، برای به دست آوردن یک جوش با خواص مکانیکی بهتر، پیشنهاد می‌شود به جای انجام دو یا چند پاس جوشکاری، فرایند جوشکاری در شرایطی انجام شود که سبب انتقال حرارت کمتر به قطعه‌کار گردد.

۳. وقوع پدیده تبلور مجدد منجر به ریز شدن شدید دانه و کاهش اندازه دانه در ناحیه اغتشاشی می‌شود. بنابراین، خواص مکانیکی این ناحیه به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. به عنوان نمونه، در حالت جوشکاری ۴ با دو پاس جوش، سختی ویکرز در ناحیه اغتشاشی نسبت به فلز پایه ۵۲/۸۵ درصد افزایش یافت. از سوی دیگر، وقوع پدیده آنیل شدن منجر به کاهش خواص ریزساختاری و مکانیکی می‌شود، لذا به عنوان مثال در حالت جوشکاری ۳ در ناحیه متأثر از گرما، سختی ویکرز ۲۸/۵۷ درصد، استحکام نهایی ۳۳/۹ درصد و چقرمگی شکست ۱۰/۹۸ درصد نسبت به فلز پایه کاهش پیدا کردند.

۴. سرعت چرخشی و انتقالی ابزار از عوامل مهم است و نقش تعیین کننده‌ای در خواص ریزساختاری و مکانیکی جوش‌ها دارند. این پارامترها بر میزان گرمای منتقل شده به قطعه‌کار تأثیر می‌گذارند و در نتیجه ویژگی‌های ذکر شده را تغییر می‌دهند. به عنوان نمونه، در حالت جوشکاری ۳ به علت سرعت چرخشی بالای ابزار، دانه‌ها در ناحیه متأثر از گرما نسبت به اندازه دانه فلز پایه ۴۲/۸ درصد رشد نمودند، در حالی که این رشد دانه در حالت جوشکاری ۲ تنها ۸/۶ درصد بود.

واژه‌نامه

انجمن مواد و آزمون آمریکا	ASTM

حفره‌ها	Dimples
نمونه کششی فشرده	C(T)
خوردگی	Corrosion
اچ کردن	Etching
جوش‌کاری اغتشاشی اصطکاکی	FSW
ناحیه متأثر از گرما	HAZ
روش تقاطع خطوط	Interception method
میکروسکوپ الکترونی روبشی	SEM
کاربید سیلیسیم	SiC
ناحیه اغتشاشی	SZ
ناحیه متأثر از کار مکانیکی و گرما	TMAZ
مؤسسه جوش‌کاری	TWI
زوئیک	ZWICK

فهرست علائم

طول ترک	a
یک طول ترک خاص (طول ترک مورد نظر)	a_i
ضخامت نمونه	B
ضخامت خالص نمونه	B_N
مدول یانگ	E
مقدار الاستیک انتگرال–J	J_{le}
مقدار پلاستیک انتگرال–J	J_{lp}
مقدار بحرانی انتگرال–J	J_{CI}
ضریب شدت تنش	K
ضریب شدت تنش زمانی که طول ترک a_i است	$K_{(i)}$
چقرمگی شکست	K_{IC}
نیرو زمانی که طول ترک a_i است	P_i
عرض نمونه	W
نسبت پواسون	ν

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] Y. F. Sun, and H. Fujii, "Investigation of the welding parameter dependent microstructure and mechanical properties of friction stir welded pure copper," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, no. 26, pp. 6879-6886, 2010. https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.07.030

[2] B. Zareh, M. Bakhshi, A.H. Gorji, and S. Nourouzi, "Analysis of forming parameters in sheet hydro-forming process," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 24, no. 1, pp. 33-52, 2012. (In Persian). https://doi.org/10.22067/fum-mech.v24i1.21491

[3] G. Payganeh, Q. Malekzadeh Fard, J. Shahbazi Karami, and O. Chaeichi Siqahkal, "Experimental study and simulation of tube ydroforming process of bi-layered aluminum-copper with axial feeding," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 28, no. 2, pp. 65-84, 2017. (In Persian) https://doi.org/10.22067/fum-mech.v28i2.48455

[4] B. Murugan, and S. Kundu, "Study on microstructure, mechanical, and electrochemical behaviour of friction stir welded joints between aluminium and 304 stainless steel," *Materials Research Express*, vol. 6, no. 1, pp. 6016515, 2018. https://doi.org/10.1088/2053-1591/aae3c1

[5] A. Ozer, A. Sik, B. Cevik, and M. Ozer, "The effect of friction stir welding parameters on microstructure and fatigue strength of CuZn37 brass alloys," *Kovove Materialy*, vol. 55, pp. 107-114, 2017. DOI: 10.4149/km_2017_2107

[6] K. Praneetha, M. Apoorva, T. Prasanna Laxmi, S. Ravi Sekhar, and S. Sravan Sashank, "Experimental investigation on aluminium alloy AA6082 and AA2014 using the friction stir welding," *Materials Today: Proceedings*, vol. 62, no. 6, pp. 3397-3404, 2022. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.270

[7] M. Atashparva, and M. Hamedi, "Investigating the effect of film in SSRSW of hastelloy X superalloy," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, vol. 30, no. 1, pp. 129-140, 2018. (In Persian)* https://doi.org/10.22067/fum-mech.v30i1.63369

[8] P. Harisha, H. M. Nanjundaswamy, H. N. Divakar, and D. Krishnan," *Tensile properties of aluminium and copper alloys friction stir welded joints," Materials Today: Proceedings*, vol. 54, pp. 223-227, 2021. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.297

[9] M. Mashayekhi, and H. Hedayati, "Effect of welding sequence and hydrotest process on welding residual stresses in stainless steel SUS304 pipes," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 22, no. 2 ,pp. 17-34, 2011. (In Persian) https://doi.org/10.22067/fum-mech.v22i2.10613

[10] F. Gao, Y. Guo, W. Yu, P. Jiang, and Zh. Liao, "Microstructure evolution of friction stir welding of Ti6321 titanium alloy based on the weld temperature below microstructure transformation temperature," *Materials Characterization*, vol. 177, pp. 111121, 2021. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111121

[11] A. A. E. Sidhom, S. A. R. Naga, and A. M. Kamal, "Friction stir spot welding of similar and dissimilar high density polyethylene and polypropylene sheets," *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, vol. 4, pp. 100076, 2022. https://doi.org/10.1016/j.aime.2022.100076

[12] A. Paoletti, F. Lambiase, and A. Di Ilio, "Optimization of friction stir welding of thermoplastics," *Procedia CIRP*, vol. 33, pp. 562-567, 2015. https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.078

[13] M. R. Ojnordy, and F. Kolahan, "Numerical analysis and experimental study on friction stir welding (Case studies on aluminum alloy and mild steel)," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 18, no. 2, pp. 263-253, 2018. (In Persian) dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1397.18.2.19.8

[14] H. L. Qin, H. Zhang, D. T. Sun, and Q. Y. Zhuang, "Corrosion behavior of friction-stir-welding joints of 2A14-T6 aluminum alloy," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 22, pp. 627-638, 2015. https://doi.org/10.1007/s12613-015-1116-9

[15] Y. F. Sun, and H. Fujii, "The effect of SiC particles on the microstructure and mechanical properties of friction stir welded pure copper joints," Mate*rials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 16-17, pp. 5470-5475, 2011. https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.03.077

[16] S. Yaghoubi, and A. Shirazi, "Mechanical properties and corrosion behavior of friction stir welded copper plates under shielding gas," *International Journal of Fatigue*, vol. 152, pp. 106419, 2021. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106419

[17] P. Kahhal, M. Ghasemi, and M. Kashfi, "The Multi-Objective Optimization of the Friction Stir Welding using the Taguchi Design Method, the Response Surface Model and the Particle Swarm Algorithm," *Scientific Journal of Aerospace Mechanics*, vol. 17, no. 4, pp. 39-54, 2021. (In Persian). dor: 20.1001.1.26455323.1400.14.4.4.2

[18] "ASTM E92-17 Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials, *ASTM International, West Conshohocken, PA*," (2016). doi: 10.1520/E0092-17

[19] "ASTM E8 / E8M-16a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, *West Conshohocken, PA*," (2016). doi: 10.1520/E0008-04.

[20] "ASTM E1820 Standard Test Methods for Fracture toughness Testing of Metallic Materials, *ASTM International*, West Conshohocken, PA," (2016). doi: 10.1520/E1820-09.

[21] W. B. Lee, and S. B. Jung, "The joint properties of copper by friction stir welding," *Materials Letters*, vol. 58, no. 6, pp. 1041-1046, 2004. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2003.08.014

[22] A. Azizi, R. V. Barenji, A. V. Barenji, and M. Hashemipour, "Microstructure and mechanical properties of friction stir welded thick pure copper plates," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 86, pp. 1985-1995, 2016. https://doi.org/10.1007/s00170-015